

2010. 12. 17 金曜日 9:30-9:50

SPICA WS

# 2018年の系外惑星学： SPICAが狙うもの

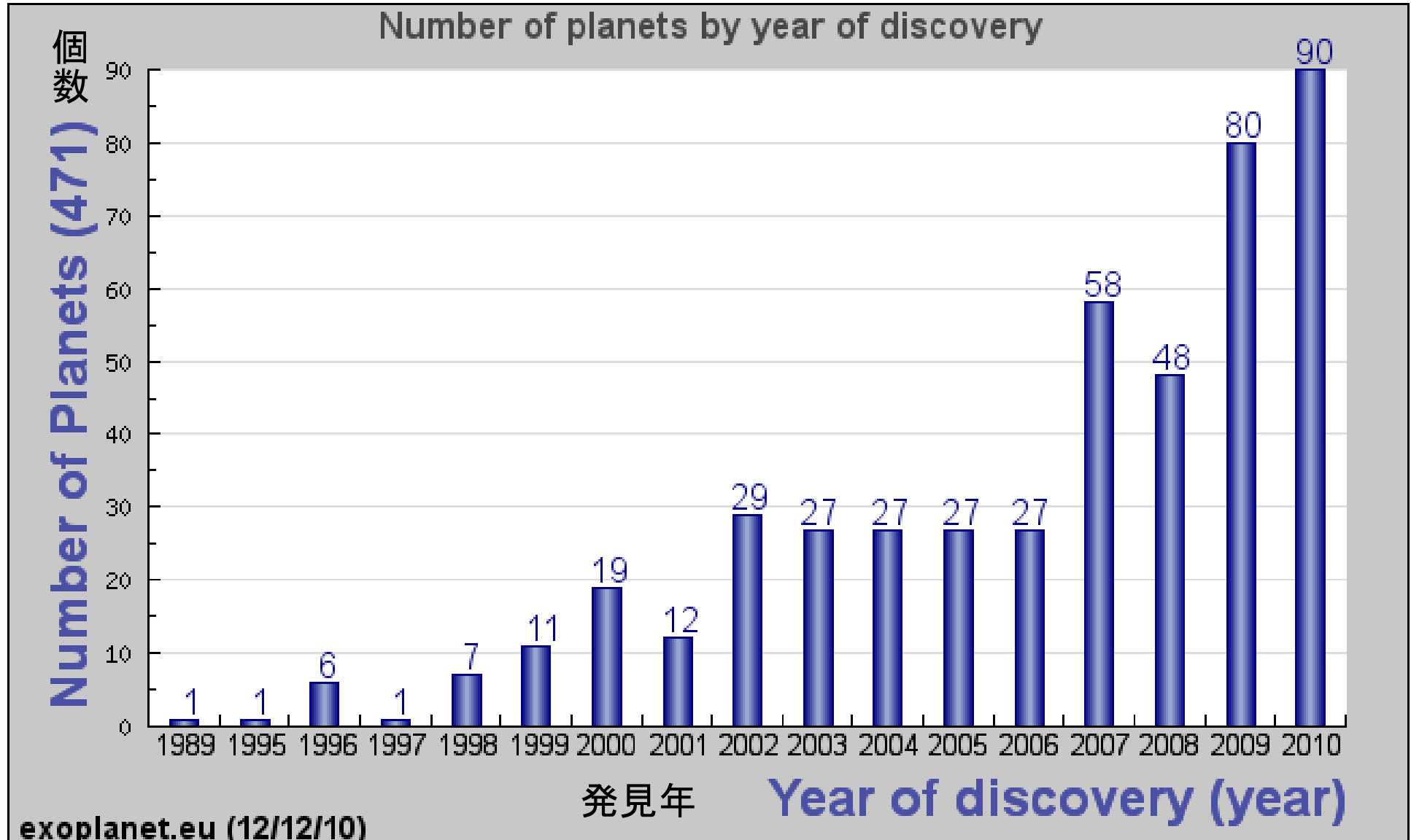
国立天文台

太陽系外惑星プロジェクト室

田村元秀

# 系外惑星候補の数 vs. 年

ドップラー法+トランジット法 (確認済のみ)



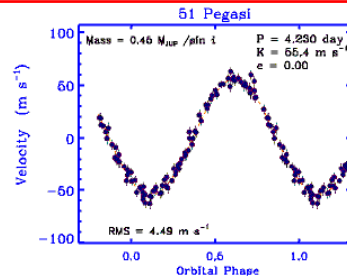
# 系外惑星検出方法

## 間接観測法

惑星からの光を直接見ているわけではない

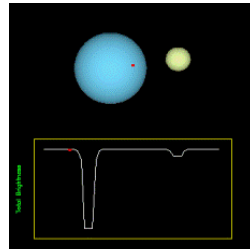
### ドップラー法

惑星の公転運動による  
恒星の**速度ふらつき**を  
分光観測により検出



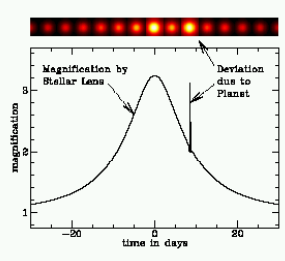
### トランジット法

惑星が恒星の前面を  
通過する際の**明るさの**  
**変化**を検出



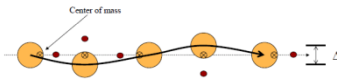
### マイクロレンズ法

惑星を伴う恒星が背景の  
恒星の近くを通過する際  
の重力レンズ効果による  
**明るさの変化**を検出



### アストロメトリ法

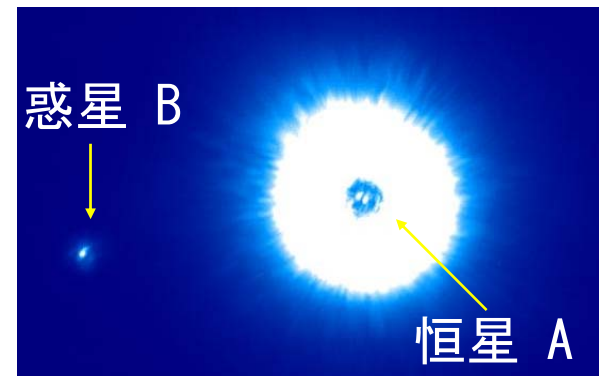
惑星の公転運動による  
恒星の**位置ふらつき**を検出



## 直接観測法

惑星と恒星を見分けて撮像する

### 直接撮像法



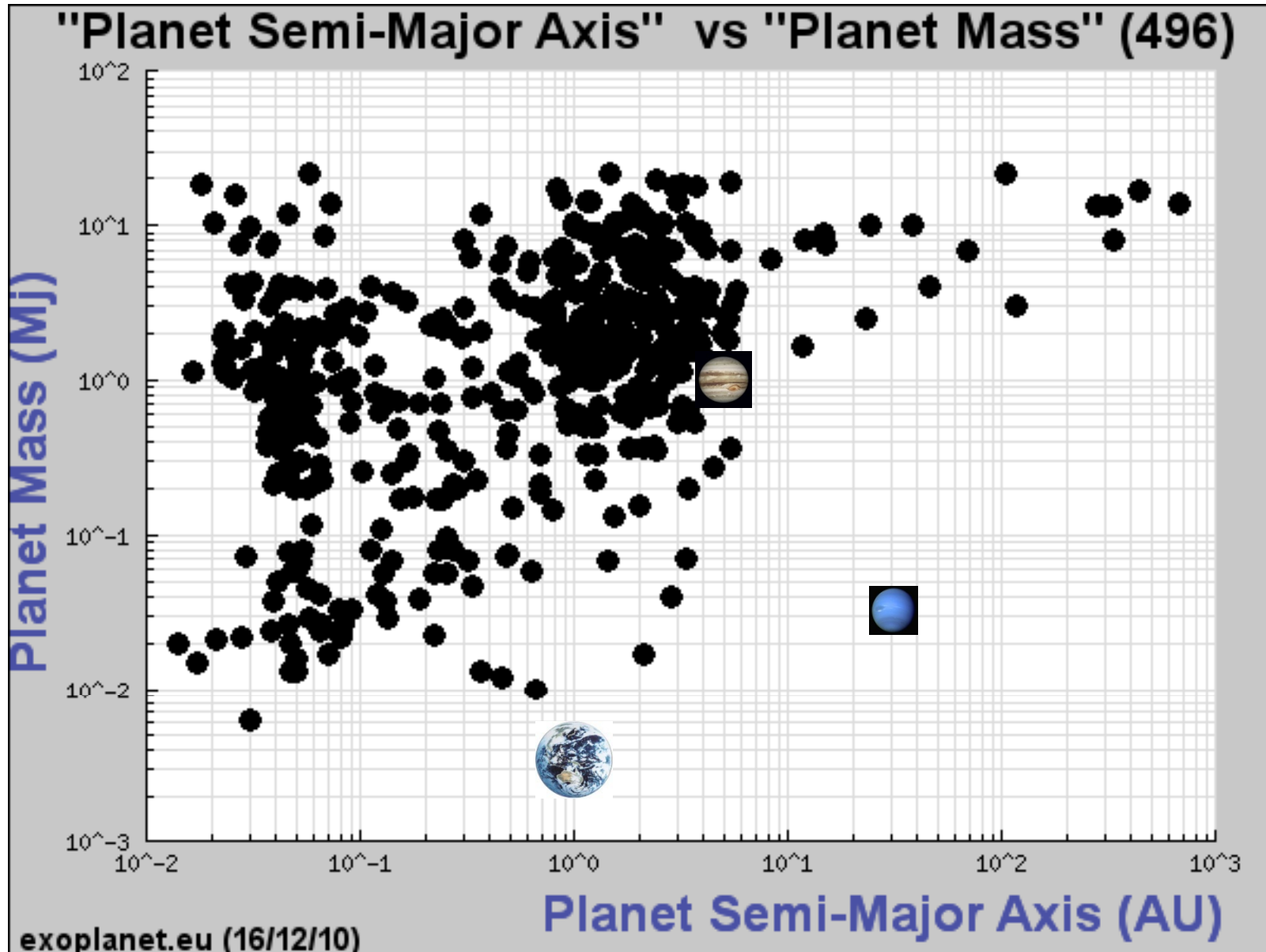
- 高解像度観測により、  
恒星と惑星を見分けて撮像する。
- 惑星からの放射を検出・撮像。
- 恒星も惑星も点状天体として写る。
- **究極の惑星観測法。**

系外惑星数は500個を超えた (+706個のトランジット候補在)

# 系外惑星観測の歴史

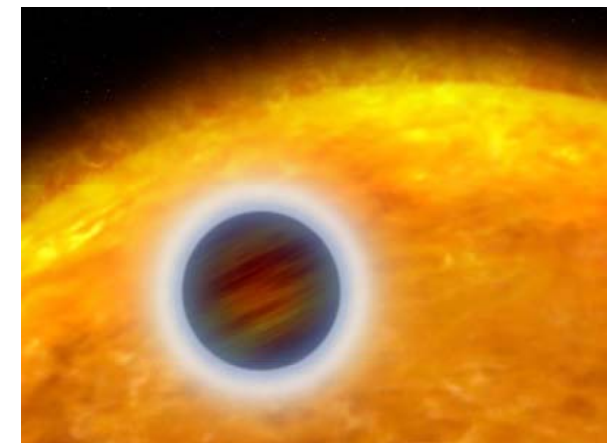
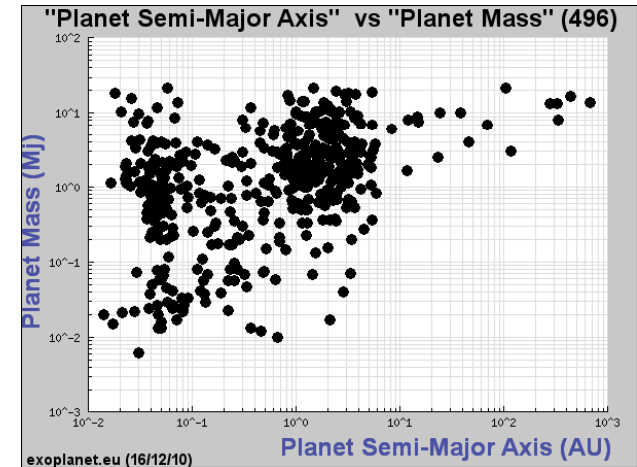
- 1969: Barnard星；周期25年、1.7木星質量惑星 (van de Kamp in AJ)
- 1979: 高精度ドップラー技術の出現とRV探査 (Campbell, Walker)
- 1989: 恒星を周回する惑星か褐色矮星？ - HD 114762 (Latham+)
- 1992: ハルサ-を周回する2つの「惑星」 - PSR B1257+12 (Wolszczan & Frail)
- 1995: **恒星を周回する惑星の最初の発見** - 51 Peg b (Mayor & Queloz)
- 1999: 最初の3 (多) 重惑星系 - ups And
- 2000: **トランジット法の成功** - HD 209458 b (Charbonneau+)  
スペース系外惑星ミッションの検討が本格化
- 2002: HD 209458b の大気 (NaD線) (Charbonneau+)  
: アストロメトリの応用 - Gliese 876 (Benedict+)
- 2004: **重力レンズ法の成功** (Bond+)
- 2005: 直接撮像の第一報告群 - GQ Lup b, DH Tau b, 2M1207 (VLT, すばる)  
: 惑星からの熱放射 (Spitzer; Demming+; Charbonneau+)
- 2008: **直接撮像：木星の10倍程度、A型星** - HR8799 (3惑星+1惑星) & Fomalhaut (Gemini, Keck); beta Pic (VLT, 2010年確認)
- 2009: Gl581e, 最小質量惑星 (1.9地球質量)  
**太陽型 (G型) 恒星の惑星候補直接撮像** (GJ758; すばるHiCIAO)
- 2010: **岩石惑星Corot-7Bの発見** (Leger+)  
**Kepler衛星データ部分リリース (地球型惑星140個程度を予報)**  
**ハビタブル地球型惑星？** (Gl581g, Vogt+)

# 系外惑星観測まとめ：2010年まで



# 系外惑星観測まとめ：2010年まで

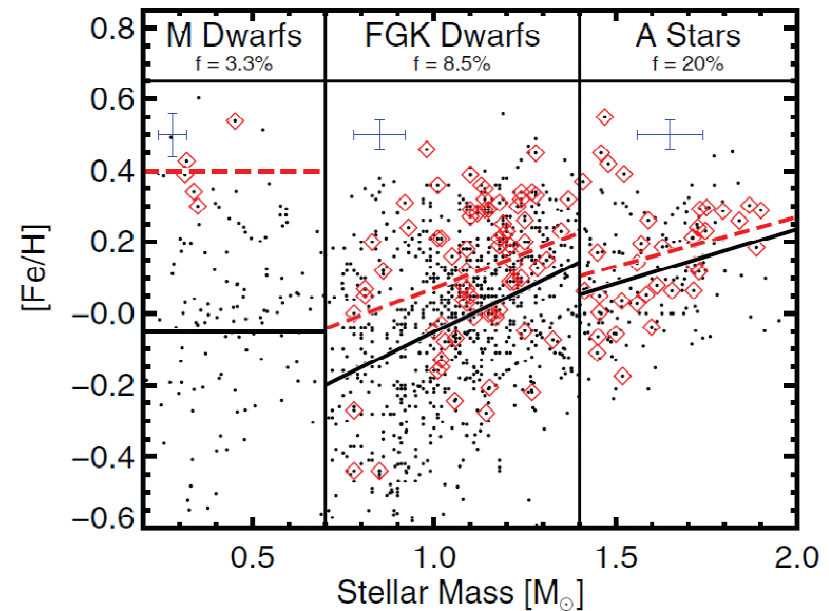
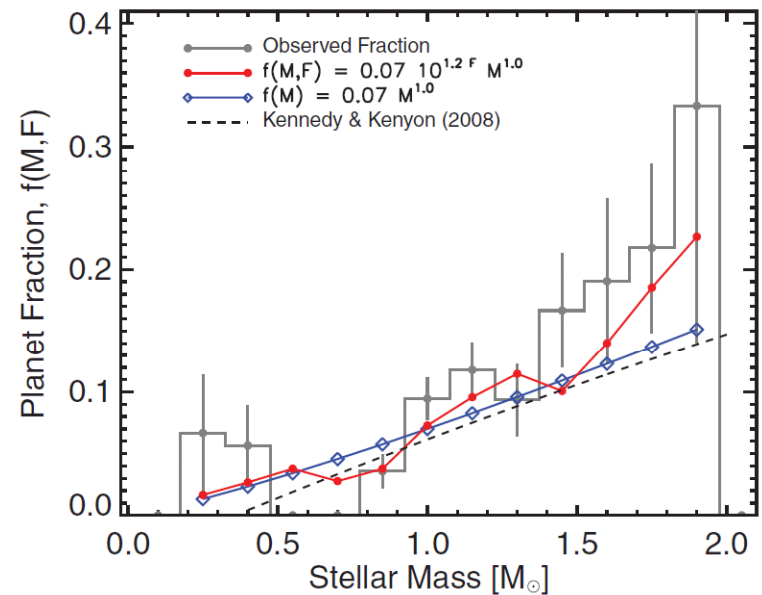
- ドップラー法による巨大惑星の統計の確立（サンプル数千個）
  - 約10%の太陽型恒星に巨大惑星が存在する（ $m \sin i$ と軌道が判明）
  - 約25%の系外惑星が複数存在
- トランジット法との併用あるいは応用により、惑星のキャラクタリゼーションにも突入
  - 約100個の惑星は半径も判明
  - 惑星大気も観測
- 画像も取得（直接撮像・分光）
- 地球型惑星に肉薄
  - トランジット、ドップラー、マイクロレンズとも



# 系外惑星の性質：頻度

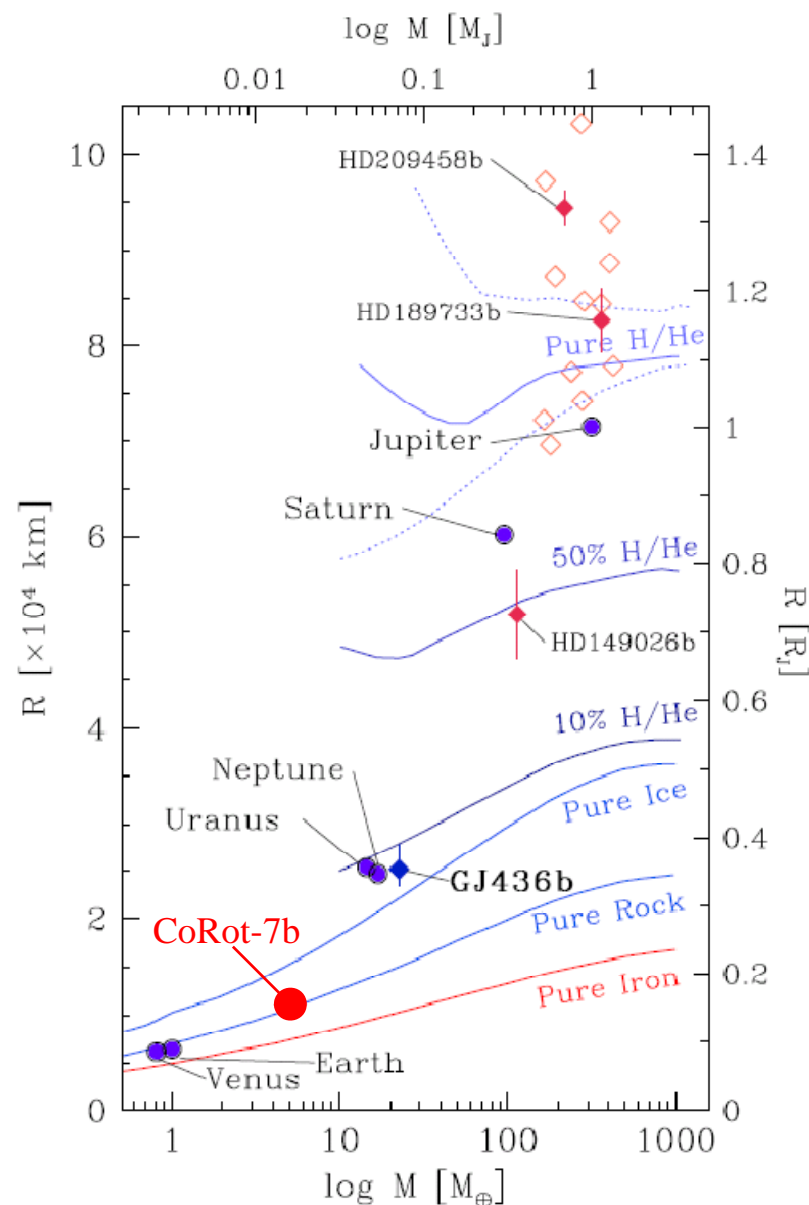
## ● Keckサーベイ

- ★ 等質性が重要
- ★  $K > 20 \text{ m/s}$  &  $a < 2.5 \text{ AU}$
- ★ 1266 stars
- ★  $0.2 - 1.9 M_{\odot}$
- ★  $2.5 \pm 0.9\%$  for  $0.4 \pm 0.3 M_{\odot}$
- ★  $6.5 \pm 0.7\%$  for  $1.0 \pm 0.3 M_{\odot}$
- ★  $11 \pm 2\%$  for  $1.6 \pm 0.3 M_{\odot}$
- ★  $N_{\text{planets}}/N_{\text{stars}} = 0.07 * (M/M_{\odot})^{1.0}$ 
  - ★ fit for  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$
- ★ Johnson et al. 2010



# 系外惑星の性質：密度

- 理論と比較的良好一致
  - ★ Hot Jupiterのいくつかに**半径超過**が見られる
    - ★ HD209458, WASP1, HAT1,
    - ★ 大気散逸 +  $\alpha$  ?
  - ★ 反対に、**高密度**の惑星
    - ★ HD1409026
    - ★ 高密度コアの存在
- ★ **より軽いトランジット惑星**  
CoRot-7bやGJ436b  
の発見により、さまざまな系外惑星の密度がわかってきた
  - ★ 氷惑星や、ほぼ地球型まで
  - ★ Leger+09

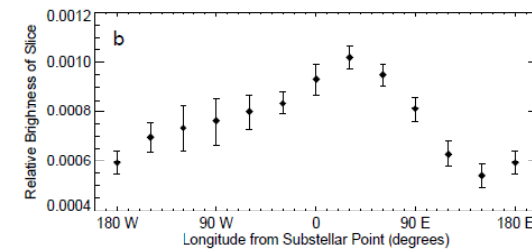
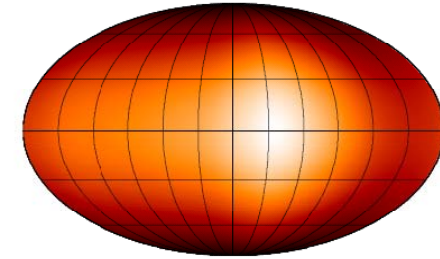




# 惑星の表面と大気

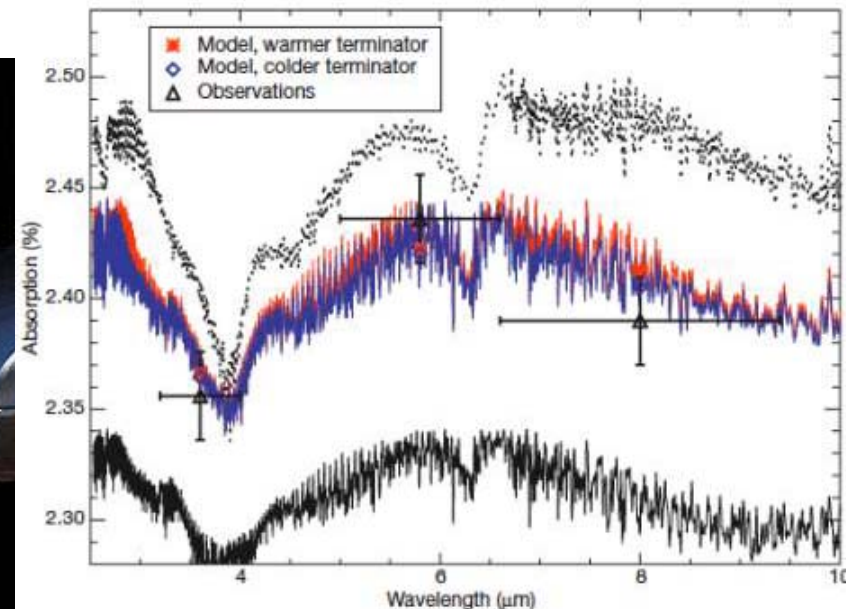
- HD189733を軌道運動に応じて赤外線観測

- 周期2.2日のホット・ジュピター
- 世界初の系外惑星の（温度）地図
- 潮汐力で固定
- 昼夜の温度差は小さかった
- 大規模な大気循環
- U Andの結果とは矛盾



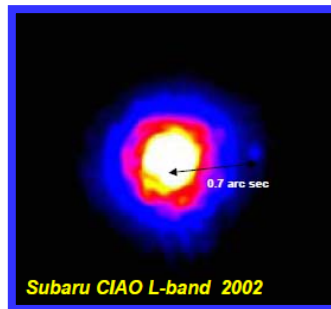
- 惑星大気中の分子を検出！

- 水
- メタン
- 二酸化炭素
- 惑星の特徴付けの時代へ
- Swain+09, Tinetti+07
- HD209458b, HD189733b

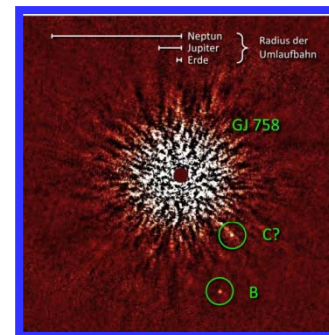
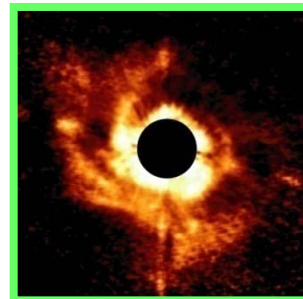


# SEEDS – Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru

- 最初の“Subaru Strategic Program (SSP)” – 新しい共同利用枠
- 新コロナグラフHiCIAOと新補償光学AO188を活用
- 5年間ですばる120夜⇒ AOトラブル⇒ 2010年11月30日から再開！
- 太陽型星およびより重い星約500個の直接観測(これまでのドップラー法やトランジット法では**未開拓の領域**: a few – 40 AU)
- 同じ半径領域の原始惑星系円盤と残骸円盤の高解像度直接観測
- これらを結び付けて、**円盤から惑星系への進化**を解明する



>100AU scale  
w/ CIAO



Solar-System  
Scale (<50AU)  
w/ HiCIAO

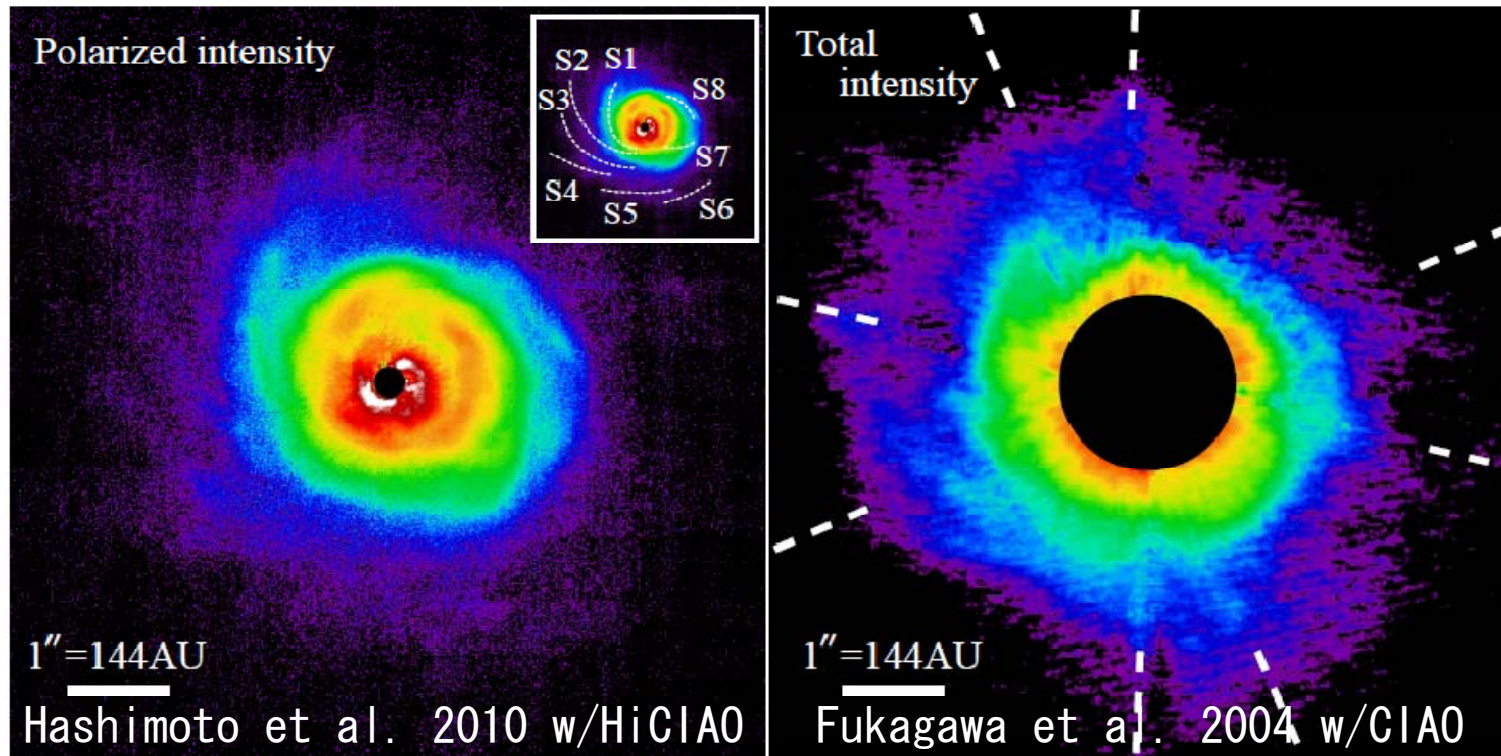


disk data shown later

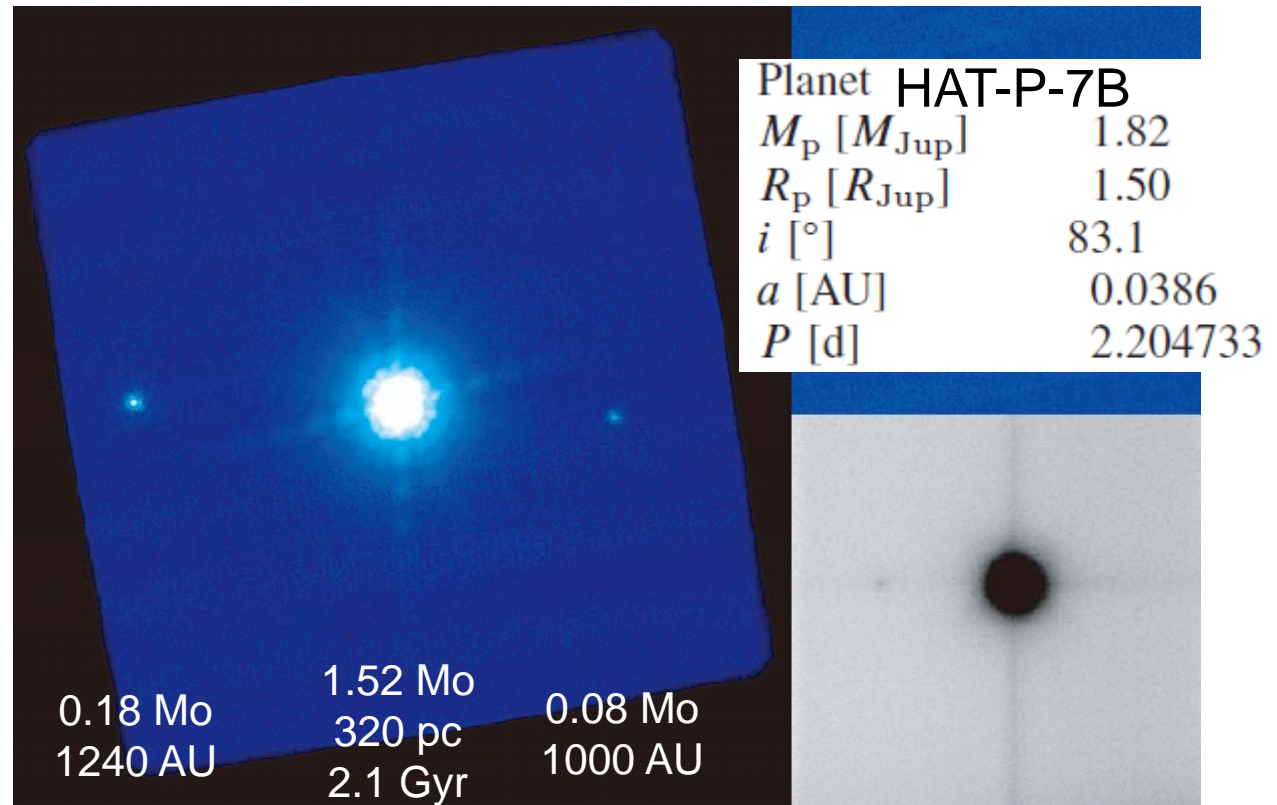
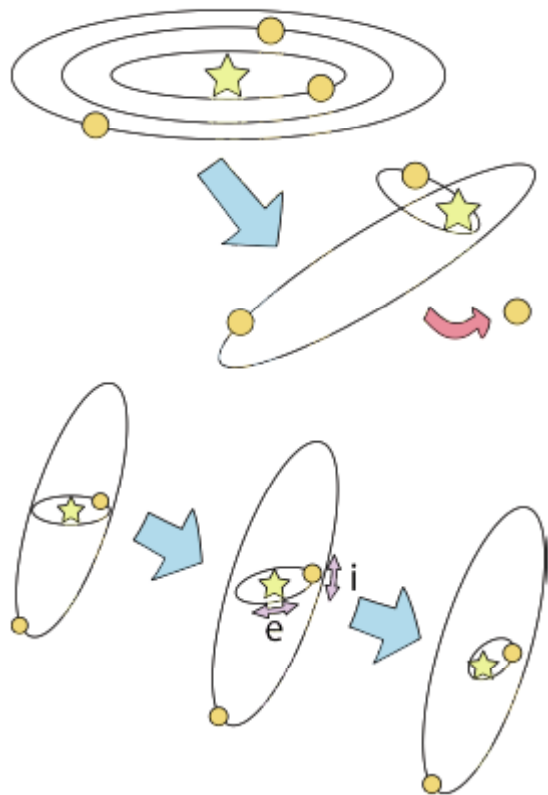
# 原始惑星系円盤のこれまでにない詳細構造

- AB Aur: Herbig Ae star, 年齢 4Myr, 恒星質量 2.4Mo, 距離 144pc
- 初めて  $r < 40$  AU を 8 AU 解像度で撮像 (1.6 $\mu$ m)
- 2重リング構造\*リング状ギャップ
- 円盤の「ワープ」や「中心星からの位置ずれ」
- Hashimoto, Tamura, Muto et al. 2010 submitted

円盤詳細構造  
↓  
惑星存在の証拠



# トランジット惑星における直接撮像観測で伴星候補を発見：HAT-P-7 (320pc) (Narita et al. 2010)

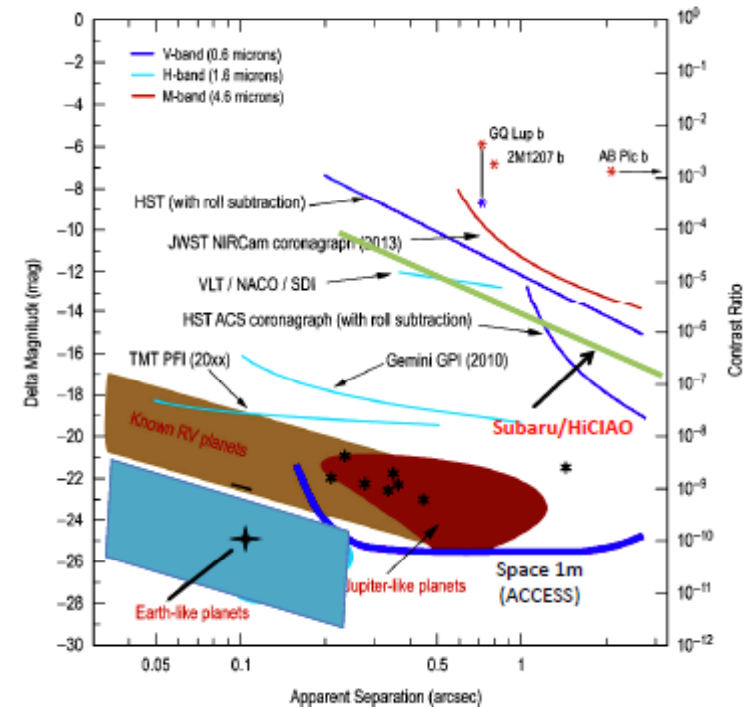
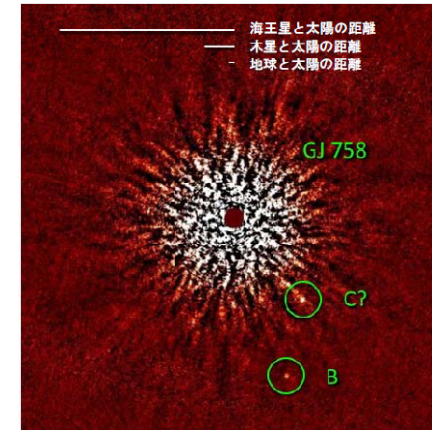


Left: 1.6 um image of HAT-P-7 (12"x12"). Upper right: A ADI/LOCI reduced Subaru image (6"x6"). Lower right: AstraLux z' band image of HAT-P-7 and the eastern companion candidate.

**直接撮像による、惑星散乱・移動理論の検証という新アプローチ**

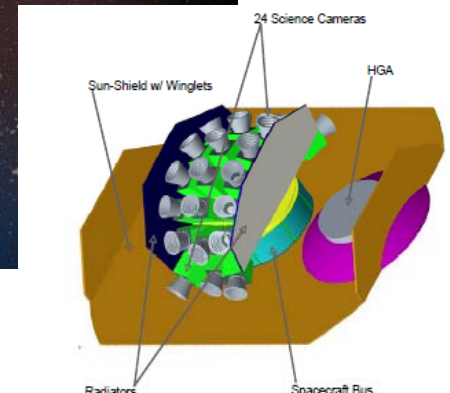
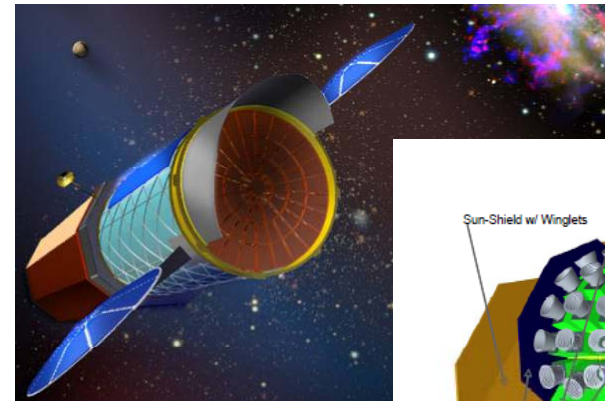
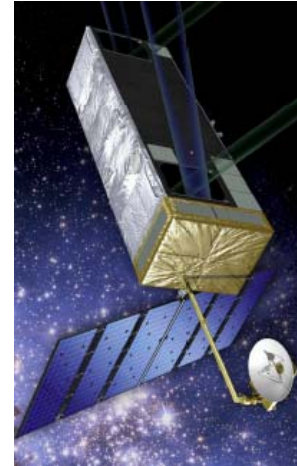
# 地上の今後10年

- ・ 8m地上による直接観測サーベイ
  - HiCIAO/SEEDS、SCEXAO、GPI、SPHEREが2013年までに揃い踏み、と予想
- ・ 遠方巨大惑星の統計
  - 主に若い惑星 (<1Gyr)
  - 恒星の総サンプルは1000個以上
    - ・ 各装置ともサーベイを計画
- ・ 遠方巨大惑星の大気分光
  - IFUの利用
- ・ 地球型惑星
  - 8m望遠鏡＋赤外ドップラー法
    - ・ 2014年以降から本格観測
    - ・ M型星のハビタブル惑星のサーベイ
  - TMTによる直接観測
    - ・ IRDで検出した惑星がそのままターゲットに



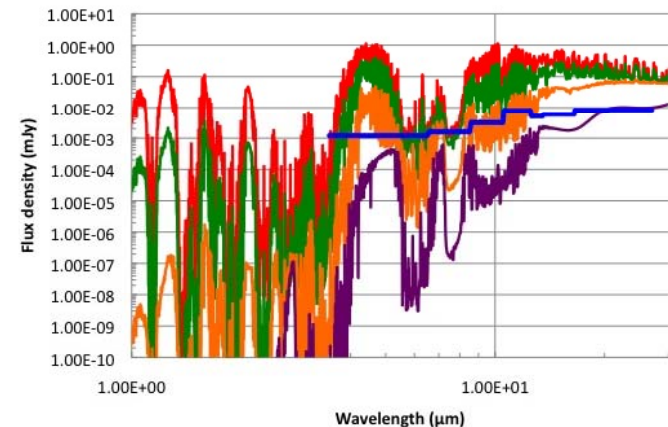
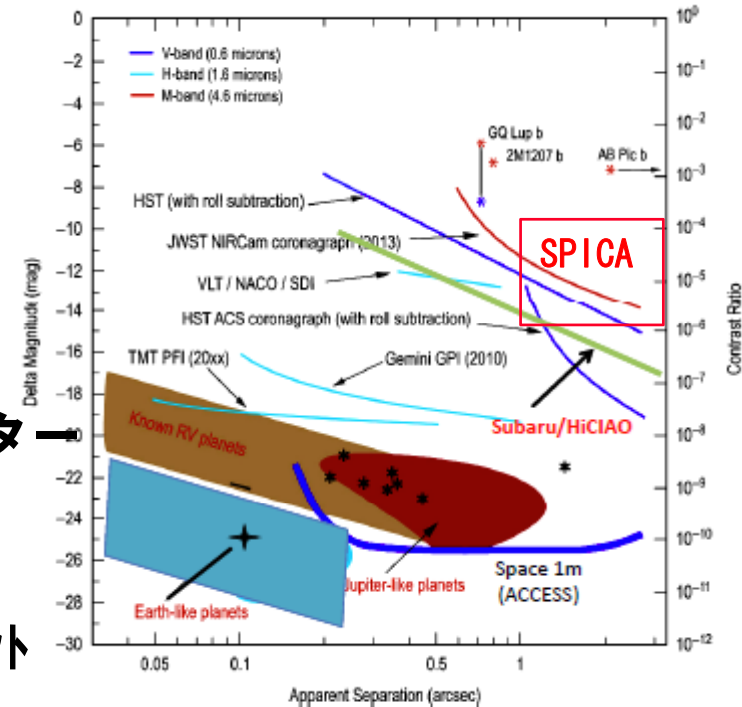
# NASAの選択：decadal report

- ・ 2010-2020の最も重要な科学の一つと位置付けたが、専用ミッションは推薦なし
  - SIM (アストロメトリ) はキャンセルされた
- ・ Kepler (トランジット) の仕上げ
  - 地球型惑星の統計
  - 詳細なフォローアップには向かない
- ・ WFIRSTの推薦
  - DEの他にマイクロレンズも
  - 地球より軽い惑星を含む統計
  - 詳細なフォローアップには向かない
- ・ EXPLOREクラスミッションの推薦
  - ASTrO, EXCEEDS, TESS, Tracer
- ・ 基礎系外惑星科学への投資



# SPICAの狙い

- ・ 巨大惑星の大気
  - 4ケタのコントラストでも可能
    - ・ JWSTとほぼ同等のコントラスト
  - JWSTより広い波長範囲かつ同時が売り
    - ・ 短波長性能は？（主鏡の実性能次第）
  - 地上より長波長側を活かす
  - 近傍の比較的年老いた惑星系が主たるターゲット
- ・ 氷惑星（松尾talk?）
  - 最近傍星ならば低温で遠方を狙えるメリット
  - 6ケタのコントラストが狙えるか？
  - JWSTより高コントラストの技術実現努力
- ・ 地球型惑星
  - SPICAでは難しい対象
    - ・ 直接観測はできない
    - ・ トランジット観測も困難
    - ・ TTVなど特殊なケース
    - ・ 割り切りが必要か？

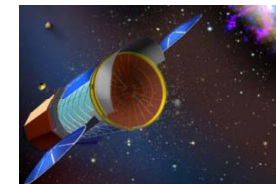
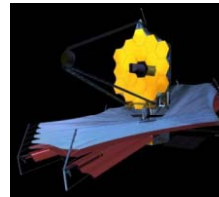


# 主に大設備による系外惑星研究の展望



HST  
JWST  
WFIRST

巨大惑星の  
撮像・分光から  
各種惑星の統計へ



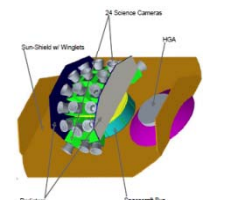
8m級  
地上鏡

(Subaru/HiCIAO,  
Gemini/GPI,  
RD, etc..)

間接法の展開  
若巨大惑星の  
撮像・分光  
地球型惑星の検出

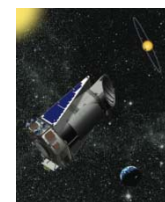


スペース等のフォローアップ



Kepler  
EXPLORE

地球型惑星の統計

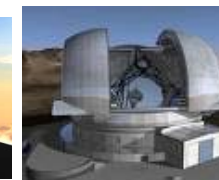


SPICA

老巨大惑星の撮像・分光

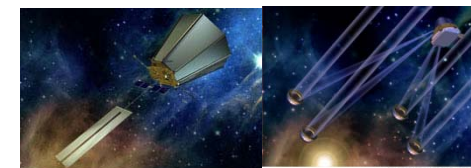
30m級  
地上鏡

巨大惑星の分光  
地球型惑星の撮像・分光 ⇔ SEITの実現がカギ



TPF

第2の地球と生命の証拠 ⇔ 可視光コロナグラフ  
から赤外干渉計へ





# 科学的な要求と要望点

- ・ ユーザとしては、もちろん系外惑星専用装置は魅力的であることは言うまでもない
  - 日本はJWSTは基本使えないことも大きい
- ・ ただし、SPICA打ち上げはJWSTの約5年後で、JWSTに対する優位性が現在の基本スペックでは限定的
  - Advanced/Baseline designとは何か実はよくわからない？ Baselineスペックでの科学的意義は限定的と思われるため、単独装置とするならば、「JWSTの性能を超えることが必須」だろう
  - 今のスペック変更は急であった。目指すサイエンスが、10年後のサイエンスとして魅力的かどうかの再検討は要らないか？
  - Fact sheetでは感度とコントラストが分離していて、分光における検出感度の波長依存性などがわからない
  - MIR装置にコロナグラフマスクを置くことによるサイエンスとの比較
    - ・ 科学的目的と装置コストのバランス感覚も必要だろう